

## Ir-192 방사선원의 밀봉 용접부 품질에 미치는 저항용접 공정변수의 영향

한인수\* · 손광재\*\*† · 이영호\* · 이유황\*\* · 이준식\*\* · 장경덕\*\* · 박을재\*\* · 박춘득\*\*\*

\*충남대학교 기계공학과

\*\*한국원자력연구원 동위원소이용기술개발부

\*\*\*호진산업기연주식회사

### The Effects of Process Parameters on Sealing Quality for Ir-192 Radiation Source Capsule using Resistance Spot Welding

In-Su Han\*, Kwang-Jae Son\*\*,†, Young-Ho Lee\*, You-Hwang Lee\*\*, Jun-Sig Lee\*\*,  
Kyung-Duk Jang\*\*, Ul-Jae Park\*\* and Chun-Deuk Park\*\*\*

\*Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

\*\*Radioisotope Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

\*\*\*Daejeon Branch, Hojin Industry Co., Daejeon 305-353, Korea

†Corresponding author : kjson@kaeri.re.kr

(Received October 14, 2008 ; Revised November 11, 2008 ; Accepted February 11, 2009)

#### Abstract

Ir-192 radiation sealed sources are widely employed to the therapeutic applications as well as the non-destructive testing. Production of Ir-192 sources requires a delicate but robust welding technique because it is employed in a high radioactive working environment. A GTA(Gas Tungsten Arc) welding technique is currently well established for this purpose. However, this welding method requires a frequent replacement of the electrode, which results in the delay of the production to take a preparatory action such as to isolate the radiation sources from the working place before getting access to the welding machine. Hence, a resistance welding technique is considered as an alternative method of the GTA welding technique. The advantages of resistance welding are high welding speed and high-rate production. Also it has very long life of electrode comparing to GTA welding. In this study, the resistance welding system and proper welding conditions were established for sealing Ir-192 source capsule. As a results of various experiments, it showed that electrode displacement can be employed as a indicator to predict welding quality. We proposed two mathematical models (linear and curvilinear) to estimate electrode displacement with process parameters such as applied force, welding current and welding time by using regression analysis method. Predicting results of both linear and curvilinear model were relatively good agreement with experiment.

Key Words : Resistance welding, Process parameters, Electrode displacement, Regression analysis, Ir-192

#### 1. 서 론

Ir-192 방사선원은 치료용 및 비파괴검사용으로 널리 사용되고 있다. 적용분야로는 의학용으로 유방암,

자궁암등의 근접치료용으로 사용되고 비파괴검사 분야에서는 방사선 투과시험용 방사선원으로 사용되고 있다<sup>1)</sup>. 밀봉방사선원은 방사성물질의 누출을 차단하고 방사성동위원소에서 방출하는 방사선만을 사용할 수 있도록 제작된다. Ir-192 선원은 방사성동위원소의 누출을 차

단하기 위하여 특수하게 제작된 캡슐에 의해 밀봉되게 되는데 여러 종류의 용접법을 이용한다. 현재 원자력연구원에서는 연구용 원자로 『하나로』와 동위원소생산시설을 이용하여 밀봉안전성을 확보하기 위해 Ir-192 선원을 GTA 용접법으로 생산하고 있다<sup>2)</sup>. 하지만 GTA 용접법은 Ir-192 방사선원 생산과정에서 용접봉의 교체를 빈번하게 하여야 하는 어려움이 있다. 용접봉 교체는 방사선원을 모두 격리한 후에 교체를 할 수 있어 시간이 오래 걸리기 때문에 대안으로 저항용접을 적용 가능성을 검토하게 되었다. 저항용접은 비교적 짧은 시간에 용접공정이 가능하여 생산성을 높을 수 있고 전극의 수명이 GTA 용접법에 비하여 매우 길기 때문에 전극 교체 작업으로 인한 작업자 피폭량을 대폭 감소시킬 수 있다.

저항용접에서의 용접부 품질은 외관의 육안검사로 식별하기 어렵기 때문에 실시간 품질 검사는 거의 불가능하다. 저항용접 공정의 품질을 감시 하는 방법으로 전극사이의 변위를 측정하여 간접적으로 평가하는 방법이 소개되어 오고 있다<sup>3)</sup>. 본 연구에서는 밀봉선원 생산을 위한 저항용접기술의 개발을 위하여 용접 시스템을 구축하였고 다양한 실험을 통하여 적절한 용접조건을 도출하였다. 또한 주요 용접공정변수인 전류, 가압력, 통전시간에 따른 전극변위의 변화량을 계측하여 저항용접 공정변수와 용접품질과의 관계에 대해 고찰하였으며 회귀분석 방법을 이용하여 공정변수에 따른 용접품질 평가 모델을 제안하였다.

## 2. 저항용접실험

### 2.1 저항용접 개요

저항용접은 접합 대상물에 압력을 가한 상태에서 전류를 통전하여, 이때 발생하는 금속의 고유저항열과 접촉부의 접촉 저항열에 의하여 열을 얻고 이로 인하여 금속이 가열 또는 용융하게 되면 가해진 압력에 의하여 접합되는 공정으로 이루어진다. 전류가 금속에 흐를 때 발생하는 발열량 Q는 다음과 같다.<sup>4)</sup>

$$Q = I^2 R t \tag{1}$$

여기서, Q는 발열량 (J), I는 통전전류 (A), R은 접촉저항 (Ω) 그리고 t는 통전시간 (s) 이다. 저항용접은 짧은 시간에 대 전류를 흘려 금속판 사이의 접촉저항을 이용하여 열을 발생시켜 접합부를 형성하게 된다.

### 2.2 실험 방법

저항용접 시스템은 Fig. 1에 보인바와 같이 가압시스템, 전극, 제어기 및 전류발생기로 구성되어 있다. 전극 가압력은 5~300 kgf 영역에서 1 kgf 단위로 제어할 수 있도록 제작하였으며 용접전원은 단상AC로 변압기는 'Chowel'사 MT-125A를 사용하였고 용접 전류는 1~30 kA, 통전시간은 1/60 s 단위로 가할 수 있도록 하였다.

저항용접 변수인 용접 전류, 통전시간, 가압력의 변화에 따른 용접 중 전극변위를 측정하였다. Table 1과 같은 조건으로 36회 실험을 실시하였다.

방사선원을 밀봉한 캡슐은 STS 304L의 오스테나이트계 스테인리스강을 사용하였다. Fig. 2는 캡슐의 용접 전후의 사진을 보여주며 화학적 조성은 Table 2와 같다.

총 36가지의 경우로 용접 후 각 시험편은 단면검사를 통하여 용접부 건전성을 확인하였으며 이때 사용한

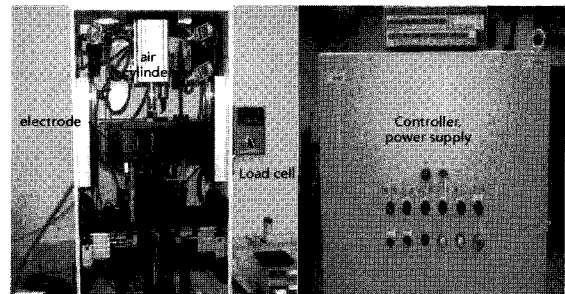


Fig. 1 Resistance spot welding system for Ir-192 capsule sealing

Table 1 Process parameters and its limits

Parameters	Symbol	Unit	Limits
Current	I	kA	26, 27, 28, 29
Time	T	cycle	80, 90, 100
Force	F	kgf	147, 178.5, 209

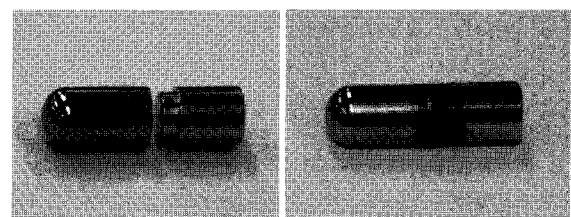


Fig. 2 Ir-192 capsule before and after welding

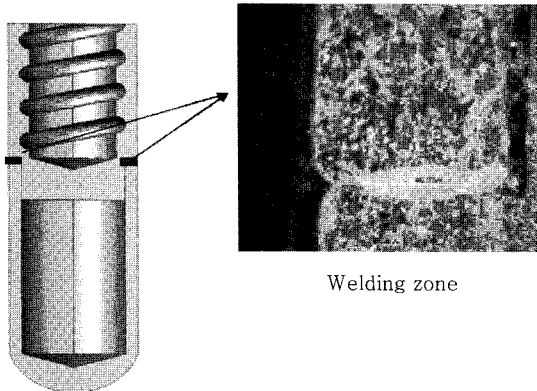
**Table 2** Chemical composition of STS 304L steel (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.03	18.0~12.0	9.0~13.0

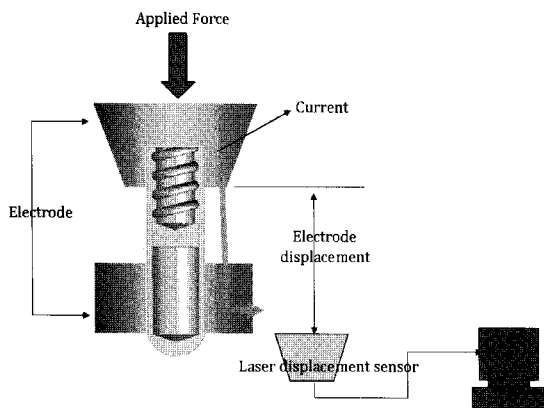
부식액은 HCl 45 ml, HNO<sub>3</sub> 15 ml을 사용하였다. 캡슐을 저항용접을 한 후 단면 사진을 Fig. 3에서 나타내었다.

본 연구에 사용된 저항용접 장치는 Fig. 4와 같이 캡슐을 하강용 지그와 하부 지그에 고정하고 가압력을 가한 상태에서 전극에 전류를 통전하여 접합하였다. 용접이 진행되는 동안 전극의 움직임은 레이저 변위센서로 측정하였다.

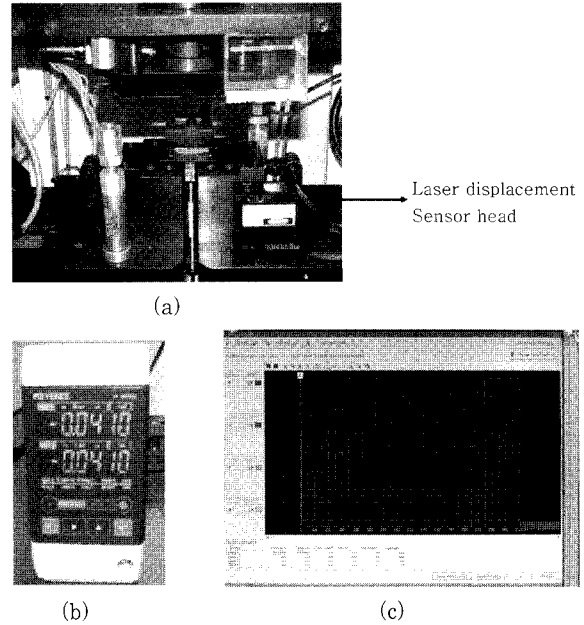
전극변위 측정은 Fig. 5와 같이 비접촉식 레이저 변위센서를 사용하였다. 레이저 변위센서는 미세한 전극의 움직임을 100 msec sampling cycle 로 측정이 가능하며 1μm(0.001mm)의 측정단위로 display panel에서 실시간으로 측정할 수 있다. 또한 변위센서로부터 얻은 신호로 전극의 움직임을 모니터링을 하였다.



**Fig. 3** Cross-sectioned photograph of Ir capsule



**Fig. 4** Schematic diagram of resistance welding



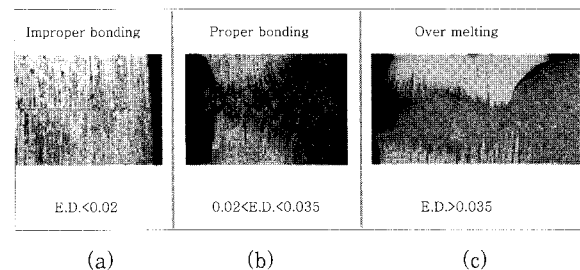
**Fig. 5** Measurement of electrode displacement (a) Mounting jig for laser displacement sensor (b) Display panel (c) Monitoring screen

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 전극변위와 공정변수와의 관계

실험결과 전극변위와 용접부 건전성과는 강한 관계가 있음을 확인하였다. Fig. 6에 보인바와 같이 최종 전극변위가 0.02~0.035 mm 일 때 건전한 용접부를 얻을 수 있었고 이 영역 보다 작은 구간에서는 용융량이 충분하지 않았고 더 큰 영역에서는 과용융 현상으로 인하여 용접불량을 초래하였다. 따라서 전극변위가 캡슐의 용접 건전성을 평가하는 척도로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

전극변위는 용접 공정 중에 발생하는 용접대상물의 가열 및 냉각에 의한 팽창과 수축에 의해 복잡한 거동



**Fig. 6** Photographs of cross-sectioned weldment (a) Improper bonding(E.D. < 0.02 mm) (b) Proper bonding(0.02 mm < E.D. < 0.035 mm) (c) Excessive melting(E.D. > 0.035 mm)

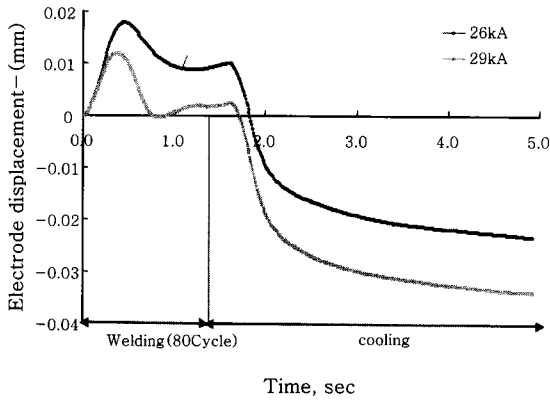


Fig. 7 Typical electrode displacement waveform

을 보인다. 전극변위는 초기 가압 후 통전 전의 변위를 기준으로 거리가 가까워 질 경우를 음수로, 멀어질 경우를 양수로 표시하였다. 전류가 가해지는 동안에 변위는 초기에 감소하였다가 다시 증가하는 양상을 보인다. 이는 초기 통전으로 용접대상물이 팽창하기 때문이며 전류가 더 가해지면 용접부의 소성변형으로 인한 변위 감소량이 팽창에 의한 변위 증가량보다 크기 때문이다. 용접이 완료된 후 용접 대상물의 냉각에 따른 수축으로 전극변위는 크게 감소하게 된다. Fig. 7은 가압력 147 kgf, 용접시간 80 cycle인 조건에서 측정된 용접시간에 따른 전극변위의 파형을 보여준다. 여기서 통전초기에 발열에 따른 용융부 열팽창이 초기에 나타나고 이어서 용융부 확산에 따른 연화된 용접부 주위조직의 소성유동(plastic flow)에 기인한 함몰 등으로 전극이 서로 가까워지는 효과가 평형을 이루어 최대값이 나타난다. 최대값을 지난 시점부터는 용융부 확산에 따른 전극함몰 현상이 지배적으로 나타나 전극변위는 계속 감소하는 경향을 보임을 알 수 있었다. 이러한 경향은 일반적인 저항용접에서 관찰되는 전극팽창 그래프와 유사함을 알 수 있었다.

Fig. 8~10에서는 공정변수의 변화에 따른 전극변위 최종값의 분포를 나타내었다. Fig. 8에서는 통전시간이 100 cycle 일 때 가압력의 변화에 따른 전극변위를 나타내었다. 가압력이 증가할수록 전극변위는 감소하는 경향을 보였다. 이것은 가압력이 증가할수록 용접부의 접촉 면적이 증가하여 저항이 줄어들게 되고 발열량이 감소하여 최종 소성 변형량이 작아지기 때문으로 판단된다<sup>5)</sup>. Fig. 9에서는 가압력이 178.5 kgf로 일정할 때 전류의 변화에 대한 전극변위를 나타내었다. 전극변위는 전류가 증가함에 따라 발열량이 증가하기 때문에 일반적으로 증가하는 경향을 보인다<sup>6)</sup>. Fig. 10에서는 통전시간에 따른 전극변위와의 관계를 나타내었는데 통

전시간이 증가하여도 전극변위에는 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 아주 짧은 시간의 통전으로 접합부가 접합되어 저항이 감소하기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다.

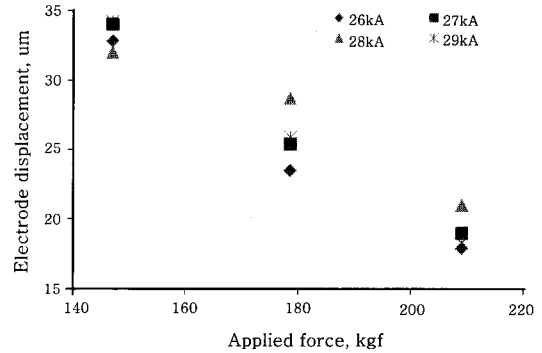


Fig. 8 Variation of final electrode displacement for various electrode force (weld time:100 cycle)

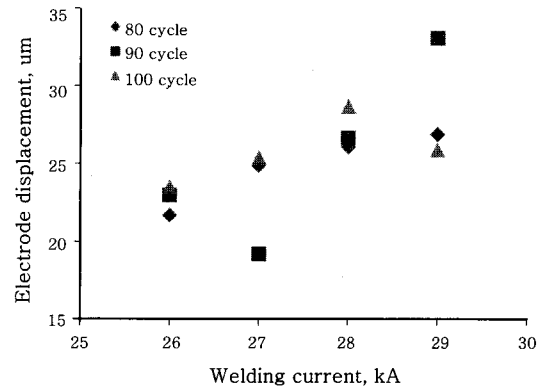


Fig. 9 Variation of final electrode displacement for various weld current (electrode force: 179kgf)

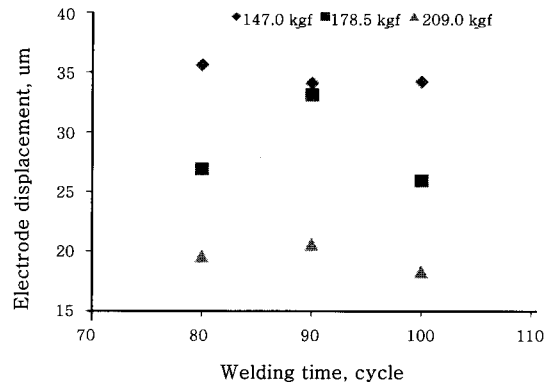


Fig. 10 Variation of final electrode displacement for various weld time (weld current:29 kA)

3.2 회귀분석

밀봉선원 캡슐의 저항용접에 따른 전극변위는 용접 공정변수에 큰 영향을 받고 전극변위는 간접적으로 저항용접부의 건전성을 평가할 수 있는 지표로 활용될 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 회귀분석방법을 이용하여 용접공정변수에 따른 전극변위 예측모델을 제안하였다. 36가지 실험결과를 바탕으로 선형 (linear)과 곡선형 (curvilinear) 두 가지 전극변위 예측 모델을 개발하였다. 종속변수를 전극변위로 선정하고 독립변수를 가압력, 통전시간, 전류로 하여 선형회귀 모형 와 곡선회귀 모형 나타내었다. 선형모델은 식(2), 곡선형 모델은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다<sup>7)</sup>.

$$D = b_0 + b_1 I + b_2 T + b_3 F \tag{2}$$

$$D = b_0 I^{b_1} T^{b_2} F^{b_3} \tag{3}$$

곡선형은 식(4), (5)와 같이 선형화하여 표현이 가능하다.

$$\ln D = b_0 + b_1 \ln I + b_2 \ln T + b_3 \ln F \tag{4}$$

$$\ln = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \tag{5}$$

여기서, D는 전극변위 F는 가압력, I는 전류, T는 용접시간, β는 매개변수이다. η는 실험 측정값의 지수 값을, β<sub>1</sub>, β<sub>2</sub>, β<sub>3</sub>, β<sub>4</sub>는 공정변수의 지수값으로 나타내었다. 실험한 측정 데이터를 토대로 변수들 간의 관련성을 규명하기 위하여 SPSS를 사용하여 회귀분석을 통한 선형과 곡선형 모델을 각각 식(6), 식(7)과 같이 도출하였다.

$$D = 0.0265 + 1.3977 \times 10^{-3} I - 4.58 \times 10^{-6} T - 2.1715 \times 10^{-4} F \tag{6}$$

$$D = 0.4338 I^{1.438} T^{-0.007} F^{-1.494} \tag{7}$$

선형회귀분석과 곡선회귀분석에서 측정값과 계산 값의 상관계수가 각각 0.936와 0.935이고 오차의 표준편차는 0.0021879와 0.0021996로 두 모델 모두 상관계수의 관계가 매우 높게 나타났다<sup>8)</sup>. (Table 3)

제안된 상관 관계식의 정확성을 판단하기 위하여 계

Table 3 Summary of regression models

Model	R	R Square	Standard Error of the Estimate
Linear	0.936	0.875	0.0021879
Curvilinear	0.935	0.874	0.0021996

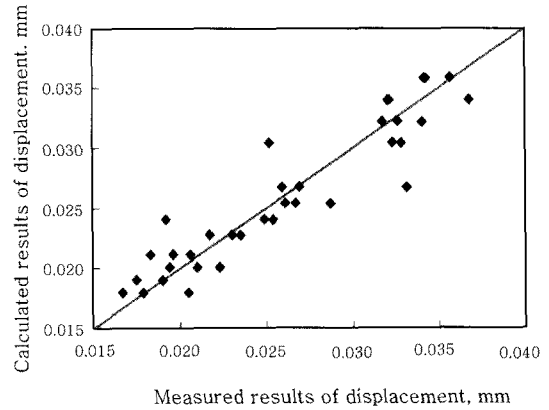


Fig. 11 Comparison of estimation to measurement using linear regression

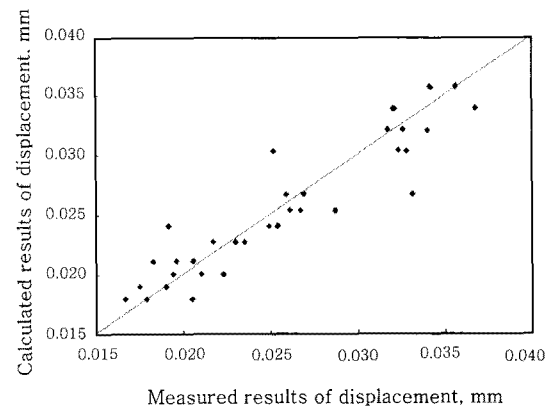


Fig. 12 Comparison of estimation to measurement using curvilinear regression

산된 값과 측정된 값 사이의 산점도 분포를 조사하였다. 최적분포를 나타내는 선이 표기된 선형과 곡선형의 산점도 분포를 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 나타내었다. 두 모델 모두 용접공정변수에 대한 전극변위를 충분히 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

제안된 모델에 의해 예측된 결과와 실험결과와의 비교를 통하여 어느 정도의 오차범위에서 정확성을 갖는지 검증하였다. 이를 위하여 오차를 식(8)과 같이 정의하였다.

$$\lambda = \frac{R_A - R_E}{R_E} \times 100 \tag{8}$$

여기서, λ는 백분오차이고, R<sub>A</sub>는 계산값, R<sub>E</sub>는 실험값을 나타낸다. 이 결과를 실험조건(Table 1)에 따른 오차범위별로 빈도수(Number)를 Fig. 13에 나타내었다. 선형과 곡선형 모두 동일한 결과를 얻을 수 있었으며 10% 오차범위 내에서 전체의 83%가 존재하였고 25% 오차 내에서 모두를 예측할 수 있음을 확인하였

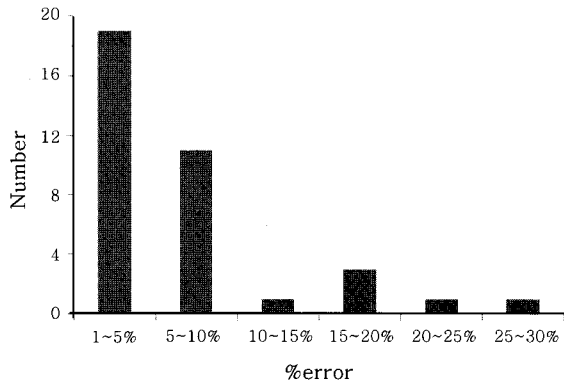


Fig. 13 Accuracy analysis of proposed model equation

다. 이것은 제안된 두 모델이 전극변위의 예측에 충분히 사용될 수 있음을 나타낸다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 밀봉선원 생산에 저항용접기술의 적용을 위하여 캡슐 용접 시스템을 구축하였으며 다양한 실험을 통하여 적절한 용접조건을 도출하였다. 또한, 저항용접의 주요 공정변수인 전류, 가압력, 통전시간에 따른 전극변위의 변화량을 계측하여 저항용접 공정변수가 미치는 용접품질에 대한 영향을 고찰한 결과 캡슐의 밀봉용접 건전성 평가 지표로 활용될 수 있음을 확인하였다. 그리고 회귀분석 방법을 이용하여 공정변수에 따른 두 가지 용접품질 평가 모델을 제안하였고 정확성을 검증한 결과 최대오차 25% 이내에서 전극변위를 예측할 수 있음을 확인하였다.

본 연구 결과는 밀봉선원 캡슐의 용접뿐만 아니라 각종 저항용접기술 개발에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. K.J. Son, S.B. Hong., K.D. Jang, H.S. Han, U.J. Park, J.S. Park, D.H. Kim, K.D. Han and C.D. Park : Development of  $^{192}\text{Ir}$  Small-Focal Source for Non-Destructive Testing Application by Using Enriched Target Material, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, **27-1** (2007), 31-38 (in Korean)
2. Hyoung Keun Lee, Hyon Soo Han and Kwang Jae Son : The Effects of Welding Parameters on the Weld Shape in Pulsed GTA Welding of a STS304L Stainless Steel Capsule, Journal of KWJS, **25-5** (2007), 64-71 (in Korean)
3. Min Jou : Real time monitoring weld quality of resistance spot welding for fabrication of sheet metal assemblies, Journal of Materials Processing Technology **132** (2003) 102-113
4. 용접·접합편람, 대한용접학회, 1998, 576
5. Hyungsuck Cho : Welding Quality Supervision and Control in Resistance Welding Processes, Journal of KWS **18-4** (2000), 424-432 (in Korean)
6. S.M. Cho : Principle of Resistance Welding and Analysis of Monitoring Results, Journal of KWS, **15-2** (1997) 1-10, (in Korean)
7. I.S. Kim, K.J. Son, Y.S. Yang, and P.K.D.V. Yaragada : Sensitivity analysis for process parameter in GMA welding processes using a factorial design method, International Journal of Machine Tool & Manufacture **43** (2003) 763-769
8. Y.J. Cho and S.H. Rhee : Weld Quality Assurance Method using Statistical Analysis of Primary Dynamic Resistance During Resistance Spot welding, Journal of KSME Vol. A, **24-10** (2000) 2581-2588, (in Korean)